

# Research on Detecting Skin Grooves in Skin Aging Analysis\*

Yaobin Zou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang  
<sup>2</sup>Institute of Intelligent Vision and Image Information, China Three Gorges University, Yichang  
Email: bwin2010@gmail.com

Received: Dec. 12th, 2011; revised: Jan. 2nd, 2012; accepted: Jan. 19th, 2012

**Abstract:** Detecting skin grooves plays an important role in the objective quantification of human skin aging, and the detection accuracy directly influences the subsequent computation of two-dimensional geometrical characteristics of the skin surface. Based on the combined control strategies consisting of data-driven and model-driven control, a novel segmentation approach to skin grooves detection was proposed in this paper. In data-driven control, the rough segmentation result was obtained by applying watershed transform to the enhanced image. In model-driven control, the information acquired from the data-driven control and prior knowledge derived from sense of vision were used for constructing a region merging model. The model was used for removing redundant watershed lines. Subjective and objective evaluations demonstrate the favorable performance of the proposed method in detecting precisely skin grooves and restraining false skin grooves.

**Keywords:** Skin Aging; Quantitative Evaluation; Watershed Transform

## 皮肤老化分析中的皮沟检测方法研究\*

邹耀斌<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>三峡大学计算机与信息学院, 宜昌  
<sup>2</sup>三峡大学智能视觉与图像信息研究所, 宜昌  
Email: bwin2010@gmail.com

收稿日期: 2011年12月12日; 修回日期: 2012年1月2日; 录用日期: 2012年1月19日

**摘要:** 皮沟检测是客观量化人体皮肤老化程度的一个关键问题, 检测精度直接影响到后续皮肤表面二维几何特征的计算。本文提出了一种基于数据驱动和模型驱动的混合控制策略来检测皮沟。其中数据驱动的控制先对输入图像进行一系列增强处理, 再进行分水岭变换以获得粗略的检测结果; 而模型驱动的控制则利用数据驱动处理的结果及视觉感知的先验知识建立一个区域合并模型, 该模型被用于移除粗略检测结果中的虚假皮沟。主观和客观实验表明, 对不同粒度的皮肤图像, 提出的方法均能精确地检测出皮沟, 并能有效地抑制虚假皮沟的出现。

**关键词:** 皮肤老化; 量化评估; 分水岭变换

### 1. 引言

随着年龄的增长、紫外线的累积及其它环境因素的影响, 人体皮肤表面结构会逐渐发生变化, 临床医学上称之为皮肤老化。对皮肤老化程度进行量化分析

是研究皮肤衰老及抗衰老的重要手段, 为从不同方面采取抗衰老措施具有重要的指导意义, 其直接应用领域包括评估抗衰老护肤品效能<sup>[1]</sup>、紫外线及其它环境因素对皮肤的影响<sup>[2]</sup>。此外, 皮肤老化程度的量化分析也为刻画身体健康状况及定义生理年龄提供了新的参考方法<sup>[3]</sup>。

\*资助信息: 三峡大学人才科研启动基金项目 KJ2011B040。

人体上肢皮肤的表面形态特征丰富(参考图 1), 这为研究皮肤老化提供了重要线索, 并使之成为生物医学及其相关领域重点研究的对象之一。另一方面, 基于数字图像技术的皮肤老化分析由于能借助数字成像设备直接地获取皮肤图像, 其在时间代价和经济成本上都较传统的基于皮肤轮廓仪的分析技术具有优势, 从而逐渐得到研究人员的重视。文献[4]利用灰度共生矩阵估算出皮沟的方向, 以分析皮沟的各向异性程度。文献[5]则先利用二维多向高斯滤波器组对皮肤的电容性图像进行增强, 然后对增强后的图像进行小波变换, 再从变换的结果中提取特征, 并分析这些特征和年龄的关系。这两种方法都是基于皮肤图像的纹理特征进行统计分析, 并没有提出直接用于检测皮沟的分割算法。文献[6]将皮肤图像进行基于区域的阈值化分割, 并在分割的基础上进行形态学细化处理以提取皮沟; 文献[7]提出了 H 级重构的分水岭算法, 并将其应用于皮沟的检测, 其分割结果优于文献[6]的结果, 但是基于 H 级重构的分水岭算法仍然难以处理较浅的皮沟以及断纹(参考图 1(b))。

外在的亮度不均和噪声干扰以及皮肤内在的多粒度特征和断纹等现象是精确检测皮沟所必须面临的问题。纯粹从图像数据本身的角度出发来处理该问题(这种思路通常被称为数据驱动的控制), 其结果难尽如人意。如果能在图像本身所提供的信息之上, 结合一些高层先验知识来建立有效的模型(这种思路通常被称为模型驱动的控制), 将很有希望产生令人满意

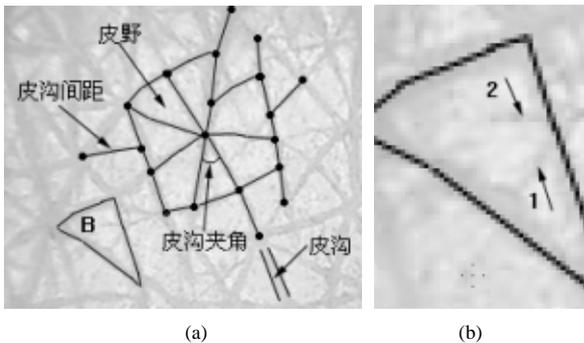


Figure 1. Illustration of the skin surface structure: (a) General view of the skin surface structure; (b) Effect of enlarged region B, where arrows 1 and 2 point to the interrupted grooves 1 and 2, respectively. The interrupted groove 1 almost runs through the epidermal ridge, whereas the interrupted groove 2 through not more than 50%

图 1. 皮肤表面结构实例: (a) 皮肤表面结构的全局示意图; (b) 区域 B 放大后的效果, 箭头 1 和 2 分别指向了一个断纹, 且断纹 1 基本上已经贯穿皮野, 而断纹 2 则贯穿了不到 50%

的结果。本文从这个思路出发, 综合了数据驱动控制和模型驱动控制的优势, 提出了一种稳健而精确的皮沟检测方法。在后面的叙述中, 称提出的方法为混合控制策略法(Combining Control Strategy, CCS)。为了评估 CCS 方法的性能, 本文将 CCS 方法和经典分水岭<sup>[8,9]</sup>、基于标识的分水岭分割算法<sup>[10]</sup>(Watershed Segmentation Based on Mark, WSM)和基于 H 级重构的分水岭算法<sup>[7]</sup>(Watershed Segmentation Based on H-Level Reconstruct, WSHR)三种方法进行比较。

## 2. 方法概述

本文设计了如图 2 所示的皮沟检测算法流程图。在该流程图中, 数据驱动的控制先对输入的原始图像进行对比度受限自适应直方图均衡化<sup>[11]</sup>(Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE)、均值滤波以及形态学增强<sup>[12]</sup>三个预处理, 然后再进行分水岭变换<sup>[8,9]</sup>以获得粗略的皮沟检测结果。尽管三个预处理能有效改善图像质量, 但是分水岭变换获得的结果仍存在明显的过分割效应, 即检测结果中含有许多虚假的皮沟。为了有效地抑制分水岭变换产生的过分割现象, 本文在模型驱动的控制中利用视觉感知的先验知识以及数据驱动控制的结果建立了区域合并模型, 该模型的输出作为皮沟检测的最终结果。

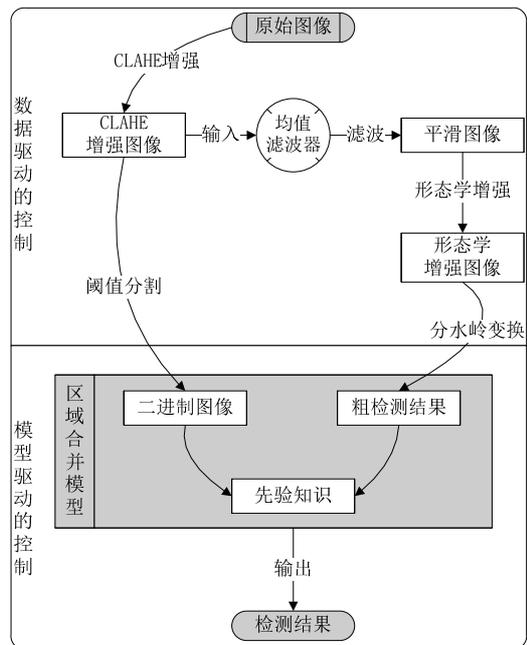


Figure 2. Algorithm flowchart of detecting skin grooves  
图 2. 皮沟检测的算法流程图

### 3. 数据驱动的控制

分割前的增强预处理被用于改善图像质量以抑制与分割目标无关的图像细节。在本文中，增强预处理主要由 CLAHE、均值滤波以及形态学增强三部分组成。

#### 3.1. CLAHE 处理

CLAHE 是直方图均衡化的改进<sup>[11]</sup>，被用于消除亮度不均现象。CLAHE 首先将整个图像划分为等大小的互不重叠的矩形小区域，对小区域相应的直方图中的箱体(Bin)所能容纳的像素个数设定一个峰值，对超过峰值的箱体中的多余像素在整个直方图范围内进行等概率再分配，然后对新分配后的每个小区域应用直方图均衡化的方法进行对比度增强。在皮肤图像分割中，将图像划分为 64 个等大小的矩形小区域，归一化峰值取 0.3，经过 CLAHE 处理后，皮肤图像中的亮度不均现象得到有效改善，皮沟和皮野的对比度非常明显(参考图 3(b))。

#### 3.2. 均值滤波处理

均值滤波器被用于抑制皮肤图像中的细小凹凸和噪声。选用均值滤波器不仅仅在于其计算代价小，更主要的原因在于该滤波器和分水岭分割算法结合时的表现不亚于诸如高斯低通滤波器、维纳滤波、双边滤波等相对复杂的滤波器。其内在的原因在于，一方面，均值滤波虽然在一定程度上模糊了皮野和皮沟的边界，但两者的主要特征依然保持较好(参考图 3(c))；另一方面，分水岭变换具有高效检测弱边缘的能力，这使得即使部分相对狭窄的皮沟在均值滤波后依然能被检测到。图 3(c)为滤波窗口大小为  $7 \times 7$  的平滑结果，皮野内的不规则细小凹凸和噪声已被有效去除。

#### 3.3. 形态学增强处理

形态学增强主要考虑使用顶帽<sup>[12]</sup>变换来进一步突出皮沟。顶帽变换可以进一步细分为白顶帽(White-Tophat, WT)和黑顶帽(Black-Tophat, BT)两种，其中用原图像减去开运算后的图像为白顶帽变换，而用闭运算后的图像减去原图像为黑顶帽变换。考虑到开运算移除比结构元素尺寸小的峰，因而通过白顶帽变换便可将原图中的亮细节提取出来；闭运算填平比

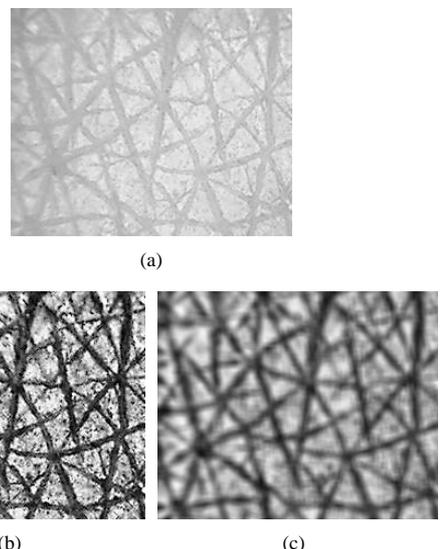


Figure 3. Image processing with CLAHE and average filter: (a) Original image; (b) Result of enhancing the original image with CLAHE; (c) Result obtained using an average filter of size  $7 \times 7$   
图 3. CLAHE 处理及均值滤波处理: (a) 原始图像; (b) CLAHE 增强结果; (c)  $7 \times 7$  均值滤波结果

结构元素小的谷，因而通过黑顶帽变换便可将原图中的暗细节提取出来(参考图 4(a), (b))。根据白顶帽和黑顶帽变换的特点，可以通过下面的公式进一步增强皮沟和皮野的对比度，以突出皮沟(参考图 4(c)):

$$I_{\text{Enhance}}(x, y) = (I + I_{WT} - I_{BT}) \quad (1)$$

其中  $I$  表示图 3(c)的图像， $I_{WT}$  和  $I_{BT}$  分别表示白顶帽和黑顶帽变换结果。

#### 3.4. 分水岭变换

分水岭变换是图像分割中的一种经典有效的方法<sup>[8,9]</sup>。分水岭变换主要有两种实现，即模拟浸水过程和模拟降水过程，而最近的研究表明两种实现本质上都是一样的<sup>[13]</sup>。分水岭变换将一幅图像视为高低起伏的地形曲面，图像中每个像素的灰度值对应于地形中的高度。在这样的地形中，有盆地(图像中的局部极小区域)，山脊(即分水岭)以及盆地和山脊之间的坡地。分水岭变换假想将地形曲面垂直浸入湖水中，并在各个盆地的最低处挖个洞，使湖水慢慢浸入各个洞，当水快要填满盆地时，就在要相交的两个盆地之间的山脊上修建堤坝。随着水位的逐渐上涨，最后各个盆地完全被水淹没，只有堤坝没有被水淹没，这个堤坝就对应着分割的目标边缘。

皮肤学上将表皮层划分为皮野和皮沟，这两个术

语和地形学上的山丘和山沟是暗合的，这启发我们使用分水岭变换来检测皮沟。注意到分水岭变换中水是从盆地的最低处进入的，因此为了能在皮肤图像上应用分水岭变换来检测出皮沟，我们需要将图 4(c)进行反相变换，变换结果参考图 4(d)。图 5 中的红色线条标示出了在图 4(d)上执行分水岭变换的结果。从图 5 可以发现，尽管绝大多数的分水岭线合理地标识出了皮沟的位置，但是仍有相当数量的分水岭线横跨了白色区域(相应于原始图像中的皮野区域)，这些分水岭线将导致过分割，即产生虚假的皮沟。

#### 4. 模型驱动的控制

为了有效地抑制分水岭变换产生的过分割现象，本文将先验知识作用于数据驱动控制的输出结果，即 Otsu 阈值分割<sup>[14]</sup>所得的二进制图像和分水岭变换所得的粗检测结果，以建立区域合并模型。该合并模型主要基于皮野块的几何特征而非亮度或者纹理特征。

为清晰起见，6 个形式化定义被先给出：

**定义 1、白色区域集：**用符号  $W$  表示一幅二进制图像中所有白色区域的集合，每个白色区域是 8 邻域连通的。记  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_p\}$ ，其中  $p$  表示该二进制图像中白色区域的总个数(参考图 5)。

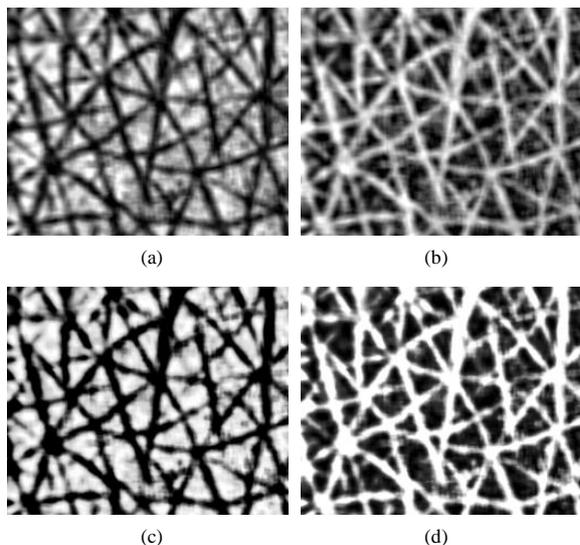


Figure 4. Morphological contrast enhancement: (a) Bright details extracted by performing a White-Tophat transformation; (b) Dark details extracted by performing a Black-Tophat transformation; (c) Result obtained using White-Tophat and Black-Tophat together; (d) Complement of the image in (c)  
图 4. 形态学对比度增强：(a)白顶帽变换提取出的亮细节；(b)黑顶帽提取出暗细节；(c)综合使用白顶帽和黑顶帽获得的增强结果；(d)(c)中图像的反相

**定义 2、黑色区域集：**用符号  $B$  表示二进制图像中黑色区域的集合。不同于  $W$ ， $B$  只有一个元素，即  $B = \{b\}$ ，这意味着将所有的黑色区域视为一个大黑色区域(参考图 5)。

**定义 3、交叉点集：**在分水岭变换的粗检测结果中，对分水岭线上的一个像素点，如果它的 8 邻域像素中有 3 个以上也在分水岭线上，则称该像素点为交叉点。此外，将粗分割图像中和四周相交的像素点亦称为交叉点(参考图 6)。用符号  $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$  表示所有交叉点的集合。

**定义 4、连通性：**任意两个交叉点  $c_i$  和  $c_j$ ，当且仅当沿分水岭线按 8 邻域搜索可以从  $c_i$  到达  $c_j$ ，则称  $c_i$  和  $c_j$  是连通的。当  $c_i$  到  $c_j$  是连通的，并且经过其它交叉点  $c_{k_1}, c_{k_2}, \dots, c_{k_m}$ ，则称路径  $c_i c_j$  是**全路径**，而路径  $c_x c_y$  称为**子路径**，其中  $x \in \{i, k_1, k_2, \dots, k_n, j\}$ ， $y \in \{i, k_1, k_2, \dots, k_n, j\}$ 。

**定义 5、交叉邻对：**任意两个交叉点  $c_i$  和  $c_j$ ，当且仅当两者是连通的，并且至少有一条路径未经过其它任何交叉点，则称  $c_i$  和  $c_j$  构成一个交叉邻对。

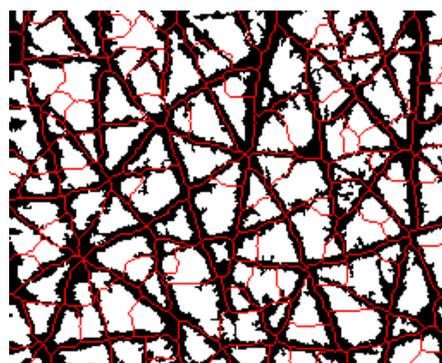


Figure 5. Rough detection result using the watershed transform, where red curves denote the watershed lines, which are superimposed on the binary image obtained by Otsu thresholding  
图 5. 分水岭变换的粗检测结果，其中红色线条表示分水岭线，它们被叠加到 Otsu 阈值分割所得的二进制图像上

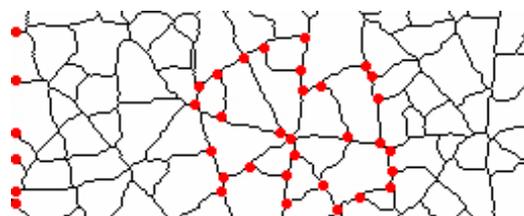


Figure 6. Rough detection result using the watershed transform and its corresponding intersections, where manual red points label part intersections  
图 6. 分水岭变换的粗检测结果及其交叉点，其中手绘的红色点标识了部分交叉点

**定义 6、移除交叉邻对：**如果  $c_i$  和  $c_j$  构成一个交叉邻对，那么称移除  $c_i$  和  $c_j$  间的像素，但是保留  $c_i$  和  $c_j$  两个交叉点本身的操作为移除交叉邻对。

在上述定义的基础上，下面将对任意交叉邻对的组成元素  $c_i$ ,  $c_j$  和  $W$  及  $B$  的相对位置关系进行完备性分析，并对每一种情形下的处理策略进行分析以建立区域合并模型。

情形 1:  $c_i$  和  $c_j$  在  $b$  区域内，并且在路径  $c_i c_j$  上的像素不进入到任何一个  $W$  类型区域。

情形 2:  $c_i$  和  $c_j$  在同一个  $w_k$  区域内，并且从  $c_i$  到  $c_j$  的路径上所有像素点位于  $w_k$  区域内(参考图 7(a))。

情形 3:  $c_i$  和  $c_j$  在同一个  $w_k$  区域内，并且从  $c_i$  到  $c_j$  的路径上有部分像素点位于  $w_k$  区域之外(参考图 7(b))。

情形 4:  $c_i$  和  $c_j$  分别位于  $w_{k1}$  和  $w_{k2}$  区域内，其中  $k1 \neq k2$ (参考图 7(c))。

上述四种情形相对简单，所以提前给出处理策略。情形 1 是正确分割的基础，这类分水岭线将被保留下来。情形 2 是典型的过分割，其处理策略是直接移除交叉邻对。情形 3 和 4 较少出现，是典型的错分割现象，其处理策略是直接移除交叉邻对。

情形 5:  $c_i$  和  $c_j$  在  $b$  区域内，并且在点对  $c_i$  和  $c_j$  间的像素将穿过  $n$  个  $W$  类型区域，其中  $n \geq 1$ 。根据  $n$  是否大于 1，可以将情形 5 进一步细分为两类子情形进行分析：即  $n=1$  和  $n \geq 2$ 。

首先考虑  $n=1$  的子情形(参考图 8(a))。计算  $c_i$  到  $c_j$  路径上位于  $w_k$  区域内的像素总数与  $c_i c_j$  路径总长度的之比  $R$ 。对  $R$  设定一个阈值  $Th$  以用于决定是否需移除交叉邻对  $c_i c_j$ ，如果  $R \geq Th$ ，移除交叉邻对；反之，则不做移除处理。阈值  $Th$  的取值基于这样一个视觉认知：当皮肤断纹较长，其深入到皮野内部的比例达到 80% 以上，在视觉上更倾向于认为其已经将皮野一分为二；反之，当断纹深入到皮野内部不到

80% 时候，视觉上认为其尚未有效将皮野分割开。注意到  $R$  刻画的是尚未被凿穿皮野长度和路径总长度之比，因此这里  $Th$  取 0.2。

由于  $n \geq 3$  的情形和  $n=2$  的情形原理相同，这里仅以  $n=2$  的情况进行分析(参考图 8(b))。计算两个比值  $R_1$  和  $R_2$ ，其中  $R_1 = \frac{S_1 \text{到} S_2 \text{路径上像素总数}}{C_i \text{到} S_3 \text{路径上像素总数}}$ ，

$R_2 = \frac{S_3 \text{到} S_4 \text{路径上像素总数}}{S_2 \text{到} C_j \text{路径上像素总数}}$ 。相应的策略是：如果

$R_1$  和  $R_2$  中至少有一个值大于或等于 0.2，那么整条曲线  $c_i c_j$  是造成过分割的，应移除交叉邻对  $c_i c_j$ ；反之，如果两个比值都小于 0.2，那么  $c_i$  和  $c_j$  间的像素保留。

情形 6:  $c_i$  和  $c_j$  一个位于  $B$  类型区域内，一个位于  $W$  类型区域内。由于  $c_i$  和  $c_j$  具有平等性，不妨设  $c_i$  位于  $b$  区域内， $c_j$  位于  $w_k$  区域内(参考图 9)。注意到  $c_j$  可能还有其它相邻的交叉点  $c_{ik}$  ( $1 \leq k \leq 7$ )，因此，对于图 9 中的  $c_j$ ，有两个特殊情形应优先处理。其一，如果有一个点  $c_{ik}$  位于和  $c_j$  相同的  $w_k$  区域内，则对  $c_{ik} c_j$  按情形 2 或 3 处理；其二，如果有一点  $c_{ik}$  位于不同于  $w_k$  的另外一个  $W$  类型区域内，则对  $c_{ik} c_j$  按情形 4 处理。

对所有的  $c_{ik}$  ( $1 \leq k \leq 7$ ) 进行了上述两种特殊情况的处理后，最终可能出现的状态有以下三种：

状态 1: 最后只有一条路径  $c_{i0} c_j$  穿过  $c_j$  并终止于  $c_j$ (参考图 10(a))。显然，此时  $c_{i0} c_j$  为孤悬的，应该予以移除。

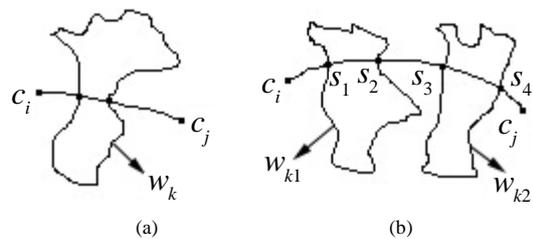


Figure 8. Schematic illustrations of case 5  
图 8. 情形 5 的示意图

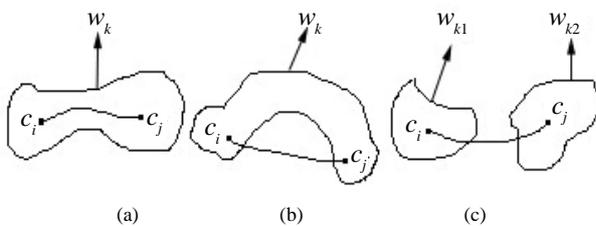


Figure 7. Schematic illustrations of case 2, 3 and 4  
图 7. 情形 2、3、4 的示意图

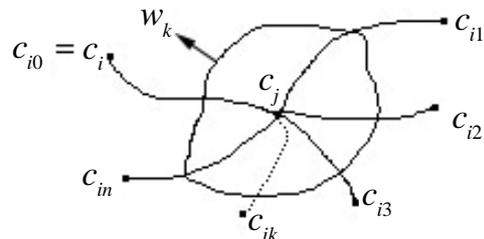


Figure 9. Schematic illustration of case 6  
图 9. 情形 6 的示意图

状态 2: 最后有两条路径  $c_{i0}c_j$  和  $c_{ik}c_j$  经过  $c_j$ (参考图 10(b)), 此时  $c_j$  已经不再是交叉点, 而  $c_{i0}$  和  $c_{ik}$  构成新的交叉邻对, 可按情形 5 处理。

状态 3: 最后至少有三条路径经过  $c_j$ 。由于多于 3 条和只有 3 条路径的情况没有本质不同, 这里以 3 条路径为例分析(参考图 10(c)), 对多于 3 条路径的情况可以类似分析。对图 10(c), 可以得到三条全路径  $c_{i0}c_jc_{ik}$ ,  $c_{i0}c_jc_{il}$  和  $c_{ik}c_jc_{il}$ 。由于每一条全路径的两个端点均在  $b$  区域内, 所以对每条全路径可以按情形 5 的策略进行判断。但是在决定是否要移除时候, 不是对全路径  $c_{i0}c_jc_{ik}$ ,  $c_{i0}c_jc_{il}$  和  $c_{ik}c_jc_{il}$  进行整体移除或者保留, 相反需要对子路径  $c_{i0}c_j$ ,  $c_{ik}c_j$ ,  $c_{il}c_j$  单独进行判断。为此, 本文设计了一张路径移除判定表(参考表 1)。在该判定表中, 如果相应全路径被确定为需要移除, 那么将全路径包含的两条子路径都标识为  $T$ ; 否则, 如果相应全路径被确定为需要保留, 那么将包含的两条子路径都标识为  $F$ 。最后对判定表进行扫描, 如果当前子路径所在行至少有一个标识为  $F$ , 那么该子路径将予以保留; 否则, 如果当前子路径所在行都是  $T$  标识, 那么该子路径将予以移除。

### 5. 实验结果与讨论

对图像分割结果的质量进行评估得到广泛的承认和重视, 主观比较和客观分析是两类主要的评估方法。其中主观比较通常将不同的方法所得结果并列,

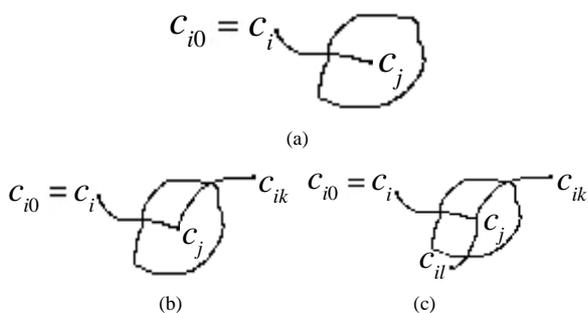


Figure 10. Schematic illustrations of three kinds of final states for case 6

图 10. 情形 6 的三种最终状态示意图

Table 1. An example of decision table for removing path  
表 1. 路径移除判定表示例

	$c_{i0}c_jc_{ik}$	$c_{i0}c_jc_{il}$	$c_{ik}c_jc_{il}$
$c_{i0}c_j$	$T$	$T$	
$c_{ik}c_j$	$T$		$F$
$c_{il}c_j$		$T$	$F$

并根据视觉来评估结果的优劣。客观分析通过建立特定的评估框架, 并在该框架内统一分析结果的优劣。本文同时采用了主观和客观评估方法, 评估试验在 60 幅分辨率为  $208 \times 256$  像素的皮肤图像上进行。

限于篇幅, 在进行主观评估时只列出两组典型的对比图, 如图 11 所示。图 11 中从上到下依次为经典分水岭<sup>[9]</sup>、基于标识的分水岭分割算法<sup>[10]</sup>(Watershed Segmentation Based on Mark, WSM)、基于 H 级重构的分水岭算法<sup>[7]</sup>(Watershed Segmentation Based on H-Level Reconstruct, WSHR)及提出的 CCS 方法的皮沟检测结果。可以发现, 经典的分水岭算法过分割现象非常严重, 其检测结果没有实际意义; WSM 和 WSHR 方法所得结果明显优于经典分水岭算法所得

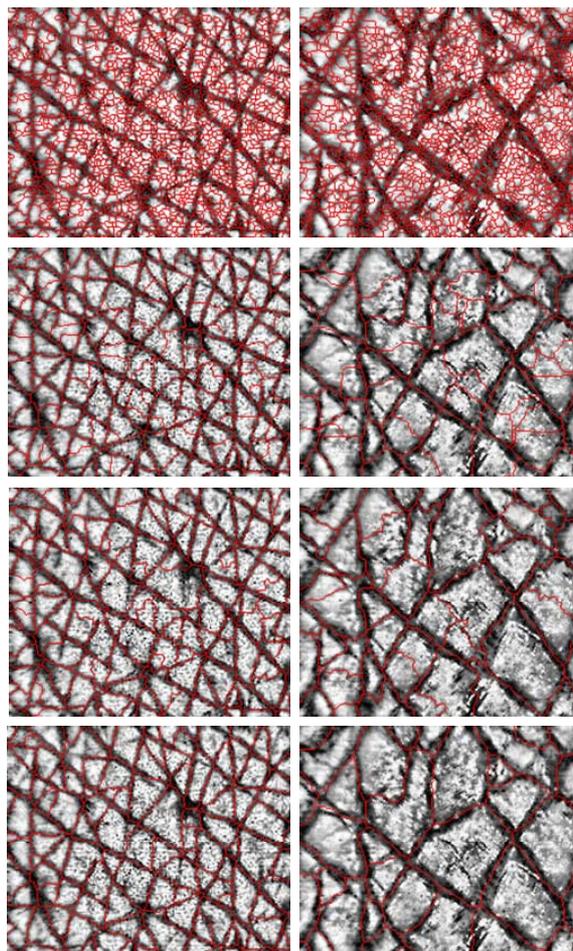


Figure 11. Superimposing the segmentation results of four different approaches on the skin images enhanced by CLAHE, the order from top to bottom is traditional watershed, WSM, WSHR and CCS

图 11. 四种不同分割方法的分割结果叠加到 CLAHE 增强后的皮肤图像上, 从上到下依次为经典分水岭、WSM、WSHR 和本文所提出的 CCS 的结果

结果,但是两者都难以处理较浅的皮沟及断纹,且局部仍有一定程度的过分割;而 CCS 方法可以很好地应对不同粒度的皮肤图像,在较为精确地定位出皮沟的同时,能有效地降低皮野区域内的过分割现象,对断纹的处理亦较好地满足视觉要求。

为了进一步刻画分割结果中的过分割和欠分割程度,本文将文献[15]中的客观评价方法加以引入。其基本思想是:用特定的记号人工标识出区域,并将人工标识的区域归为集合  $F$ 。对自动分割出的所有的区域,如果某一区域含有人工标识的记号,将该区域归入集合  $P$ ;反之,如果某一区域不含有工标识的记号,则将该区域归入集合  $Q$ 。记集合  $F$  中的元素个数为  $m$ ,集合  $P$  中元素的个数为  $n$ ,集合  $Q$  中元素的个数为  $l$ ,定义再现度(Recall)为  $rr = l/m$ ,精确度(Precision)为  $pr = n/m$ 。

显然  $1-rr$  和  $1-pr$  分别刻画了分割结果中的过分割和欠分割的程度。 $1-rr$  和  $1-pr$  越小意味着过分割和欠分割程度越小,分割质量也越高,最理想的情况是  $1-rr$  和  $1-pr$  均为 0,即不出现过分割也不出现欠分割。如果视过分割和欠分割对最终分割质量的影响因子相等,那么距离  $w = \sqrt{(1-rr)^2 + (1-pr)^2}$  将可以从总体上刻画分割质量的优劣。图 12 显示了 WSM、WSHR 和 CCS 三种方法分割结果的过分割和欠分割程度。从图 12(a)可以发现,WSM 存在较为严重的过分割现象,最好的结果其过分割比例亦达 30%之多,最差的过分割比例超过 200%,并且有 71%的图像其过分割比例超过 50%。尽管 WSHR 在抑制过分割方面优于 WSM,但是从图 12(b)可以发现,其产生的欠分割现象却比较严重,有 60%的图像其欠分割比例超过 10%。相比之下,本文所提出的 CCS 方法过分割比例较低,最差的过分割比例亦未超过 10%,有 70%的图像其过分割比例低于 7%,46%的图像过分割比例低于 5%。尽管 CCS 方法的欠分割比例略高于 WSM 方法,但是从图 12(c)可以看出,CCS 方法的总体分割质量依然明显优于 WSM 和 WSHR 两种方法。

## 6. 结论

在混合控制策略中,数据驱动和模型驱动的控制两者本身并无优劣之分,它们相互协作,及时反馈是获得良好分割结果的关键,新提出的 CCS 方法在抑制

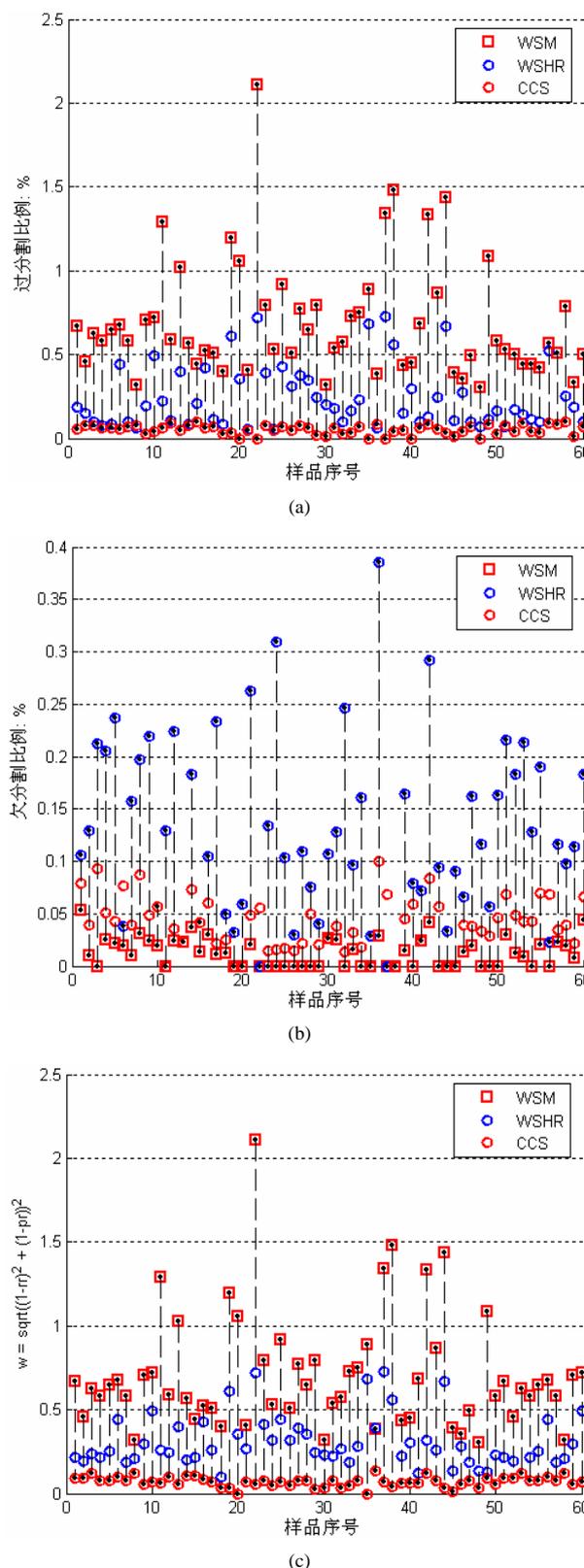


Figure 12. Segmentation quality evaluation for WSM, WSHR and CCS: (a) Over segmentation; (b) Under segmentation; (c) Distance  $w$   
图 12. WSM、WSHR 和本文所提出的 CCS 分割质量评估: (a) 过分割程度; (b) 欠分割程度; (c) 距离  $w$

过分割和检测皮沟所表现出的良好性能证实了这一点。在数据驱动的控制中, 经过 CLAHE、均值滤波和形态学变换三步处理后, 原始退化图像中的皮沟被有效增强, 皮野中的不规则细节和噪声亦被有效抑制, 从而显著减少了图像中局部极小值区域的数量。人类视觉对图像的全局理解被引入到模型驱动的控制中, 并通过结合数据驱动控制中的阈值化分割和分水岭分割的结果, 使得 CCS 方法对不同粒度的皮肤图像都能有效地消除过分割现象, 在保持良好检测效果的同时, 对断纹的处理亦较好地满足视觉要求。

## 参考文献 (References)

- [1] J. M. Lagarde, C. Rouvrais and D. Black. Topography and anisotropy of the skin surface with ageing. *Skin Research and Technology*, 2005, 11(2): 110-119.
- [2] Q. Gao, L. W. Hu, Y. Wang, et al. Skin texture parameters of the dorsal hand in evaluating skin aging in China. *Skin Research and Technology*, 2011, 17(4): 420-426.
- [3] M. B. Purba, A. Kouris-Blazos, N. Wattanapenpaiboon, et al. Can skin wrinkling in a site that has received limited sun exposure be used as a marker of health status and biological age. *Age and Ageing*, 2001, 30(3): 227-234.
- [4] J. L. Leveque, B. Querleux. SkinChip, a new tool for investigating the skin surface *in vivo*. *Skin Research and Technology*, 2003, 9(4): 343-347.
- [5] A. Bevilacqua, A. Gherardi and R. Guerrieri. Studying skin ageing through wavelet-based analysis of capacitive images. *Proceeding of the 2005 IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, Como: IEEE Press, 2005: 360-365.
- [6] 彭洪洪, 金伟其, 一种基于皮肤纹理特征的皮肤分类算法[J], *光学技术*, 2004, 30(4): 467-472.
- [7] T. Zhao. Segmentation of skin image and extraction of texture line. Beijing University of Technology, 2005.
- [8] J. B. T. M. Roerdink, A. Meijster. The watershed transform: Definitions, algorithms, and parallelization strategies. *Fundamenta Informaticae*, 2000, 41(1-2): 187-228.
- [9] L. Vincent, P. Soille. Watershed in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(6): 583-598.
- [10] P. Soille. *Morphological image analysis: Principles and Applications* (2nd Edition). Berlin: Springer-Verlag, 2003: 200-205.
- [11] A. Pezeshek, R. L. Tutwiler. Contour line recognition and extraction from scanned colour maps using dual quantization of the intensity image, *Proceeding of the 8th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, New Mexico: IEEE Press, 2008: 173-176.
- [12] A. Hanbury. The morphological top-hat operator generalised to multi-channel images. *Processings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, Cambridge: IEEE CS Press, 2004: 672-675.
- [13] Y. C. Lin, Y. P. Tsai, Y. P. Huang, et al., Comparison between immersion-based and toboggan-based watershed image segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(3): 632-640.
- [14] N. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [15] R. J. O' Callaghan, D. R. Bull. Combined morphological-spectral unsupervised image segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(1): 49-62.